

**Розробка мультимодального (залізнично-водного) ланцюга постачання зернових методом агентної симуляції**

**А. А. Мазаракі, В. І. Мацюк, Н. Б. Ільченко, О. О. Кавун-Мошковська, Т. М. Григоренко**

*Представлені результати імітаційного моделювання багатоелементного ланцюга постачання зернових залізнично-водним мультимодальним маршрутом. Представлено математичне обґрунтування оптимізаційної задачі. За критерій оптимізації обрано мінімальний час доставки вантажів. Обмеженнями оптимізації обрано межі припустимого використання (завантаження) парків транспортних одиниць залізничного і водного транспортів. Оптимізаційна модель представляє собою багатопараметричну задачу стохастичного програмування. Цільова функція моделі представлена у неявному виразі. Пошук рішення оптимізаційної моделі здійснено за допомогою експериментів із розробленою імітаційною моделлю.*

*Імітаційна модель базується на дискретно-подієвому та агентному принципах, імітує взаємодію двох залізничних та однієї морської транспортно-технологічних ліній, а також термінальних пунктів накопичення, зберігання та перевантаження партій вантажу. У якості вантажного модуля виступає одна тона зерна пшениці.*

*Імітаційна модель розроблена у середовищі AnyLogic RE (США) та Java SE (США). Алгоритм імітаційної моделі передбачає взаємодію: популяцій агентів пунктів стикування транспорту; агентів транспортно-технологічних ліній; популяцій агентів парків транспортних одиниць; агентів інформаційних заявок на транспортування. Модель реалізовано на прикладі реального процесу постачання зернових з України до Єгипту.*

*Дослідження моделі проводились методом цілочисельної оптимізації. У результаті експериментів встановлено оптимальні значення: потрібного парку вагонів, локомотивів, морських суден. Крім того, встановлено потрібну місткість зерносховищ на станціях відправлення та терміналах морських портів, а також необхідну ємність колійного розвитку залізничних станцій. Середній час доставки отримано в межах 185 годин.*

*Ключові слова: мультимодальна логістика, ланцюг постачання зернових, агентна імітація, залізнично-водний маршрут.*

## **1. Вступ**

Оптимізація бізнес-процесів ланцюгів постачання мультимодальними маршрутами відноситься до складних, комплексних прикладних задач. Масштаб таких задач набуває все більшої актуальності та масштабності із розвитком та розширенням торгівельних зв'язків глобальної економіки.

Разом з тим, одною з головних задач оптимізації процесів планування та організації мультимодальної логістики є такі, що пов'язані із встановленням оптимальних параметрів транспортної, складської (термінальної) та переробної інфраструктури. І проблемою є те, що такі завдання, через свою масштабність та комплексність, потребують системного підходу. Однак аналітичні методи прикладної математики досить обмежені при оптимізації одразу всього мультимодального процесу ланцюга постачання. Крім того, зазначений науковий інструментарій складно застосовувати при оцінці стохастичних потоків транспортування та переробці вантажів. Одним з небагатьох інструментів прикладних досліджень складних мультимодальних маршрутів залишається комп'ютерна симуляція.

Отже актуальними є дослідження, спрямовані на розробку мультимодальних (залізнично-водних) ланцюгів постачання масових вантажів, зокрема на основі використання агентної комп'ютерної симуляції.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

У дослідженнях останнього десятиріччя оптимізацією ланцюгів постачання вивчалось багато питань підвищення ефективності складної, багатоелементної логістики постачання, доставки вантажів та пасажирів. При тому, за критерії оптимізації приймається не тільки класичні, натурально-грошові вимірники, а й показники надійності, ризику та безпеки.

За допомогою агентної симуляції у середовищі MATSim (Німеччина) вивчається проблематика підвищення ефективності натуральних спостережень, збору та обробки статистичних даних [1] загального функціонування міської транспортної мережі (на прикладі Берліну) [2], у різних часових горизонтах [3].

У роботі [4] представлені результати імітаційного моделювання поведінки пасажирів, залежно від точності та швидкості надходження інформації про непередбачувані відмови у роботі міського транспорту. Результатом таких досліджень виступають рекомендації оперативного перепланування маршрутів руху громадського транспорту [5] та оптимізації управління автобусним парком [6], що збільшує прибуток на 12 % [7]. Дослідження [8] визначає оптимальні моделі взаємодії пасажирів на велосипедах із іншими видами громадського транспорту. Разом з тим, моделі у зазначених працях справедливі тільки для пасажирських перевезень і, крім того, не враховують роботу пунктів пересадки пасажирів.

За допомогою комплексної агентної симуляції автомобільного трафіку вдалось встановити, що збільшення інформаційності фактичних даних маршрутів автотранспорту за допомогою збору показників геолокації [9] та мобільного зв'язку [10] ефективність поставок зростає [1]. Дослідження [11] оцінюють данні геолокації персонального мобільного зв'язку пасажирів як спосіб визначення попиту на перевезення, політики функціонування транспортних компаній, у тому числі у питаннях землекористування. В інших схожих дослідженнях міської агломерації Роттердаму [1] наводяться інструменти прийняття логістичних рішень планування міської автотранспортної мережі. За допомогою схожих досліджень [12] оптимізується алгоритм управління дозволяючими світлофорами міського трафіку, що забезпечує підвищення відмовостійкості всієї автотранспортної системи міста. Водночас у зазначених дослідженнях не визна-

чається справедливість результатів до багатoeлементних ланцюгів постачання різними, не тільки автомобільним, видами транспорту.

Агентне моделювання із низьким рівнем абстракції дозволяє моделювати ризики різного характеру (пов'язані із погодними умовами, піратами та ін.) складних морських маршрутів [13]. Для оцінки функції «винності» [14] та ефективності системи транспортної безпеки [15] дослідники успішно використали Байєсівську та інші статистичні моделі. Хоча, при використанні методів комп'ютерної симуляції, результати могли забезпечити вищий рівень достовірності. Інші дослідники у своїй роботі [16] доводять необхідність накопичення бази інформаційних потоків на основі локальних агентів інформаційних систем.

Однак ключовим у оптимізації логістичних процесів є встановлення раціональних параметрів відповідних бізнес-процесів [17]. Так, за допомогою динамічної оптимізації визначається відстань доставки замовлень [18]. В інших схожих за інструментом дослідженнях оптимізуються вагонопотоки по залізничній мережі [19] та у розвинених залізничних вузлах [20]. Результатом досліджень [21] є оцінка витрат на обслуговування споживачів при перевезенні малих партій швидкопсувних вантажів в умовах міста. Результатами наступних досліджень є інструмент прийняття рішень вибору варіанту організації контейнерних перевезень в рамках голландської стратегічної вантажної транспортної моделі “BasGoed” [22]. Схожі дослідження вирішували подібну задачу за рахунок оптимізації мережі пунктів концентрації вантажопотоків [23] та розташування транзитних морських портів [24]. Результатом інших досліджень пропонується методологія раціонального вибору ланцюга поставок швидкопсувних вантажів [25]. Зазначені роботи забезпечують потрібну системність у дослідженнях, однак достовірність результатів та адекватність моделей може бути більшою при застосуванні імітаційних моделей.

Більшість вказаних вище робіт є результатом аналітичних досліджень. Підпроцеси та функціональні елементи розглядається окремо, або умовно в єдиній логістичній системі, що негативно впливає на абстрактність моделі та достовірність результатів.

Іншою проблемою у використанні аналітичної математики, при дослідженні логістичних процесів, є складність у врахуванні стохастичної природи транспортних потоків, моментів дискретного переходу між фазами транспортного обслуговування, розмірами вантажних партій, тощо. Тому дані дослідження направлені на розробку імітаційних моделей, які дозволяють врахувати системність і стохастичність логістичних процесів, та забезпечити низький рівень абстракції математичного моделювання.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів складного ланцюга постачання зернових мультимодальним (залізнично-водним) маршрутом. Це дасть можливість підвищити ефективність постачання зернових при організації залізнично-водних сполучень.

Для досягнення мети вирішувалися наступні задачі:

- формалізувати процес мультимодального ланцюга постачання оптимізаційною математичною моделлю;
- на базі агентного та дискретно-подієвого принципів розробити імітаційну модель мультимодального ланцюга постачання залізнично-водним маршрутом;
- реалізувати розроблену імітаційну модель постачання зернових з України до Єгипту.

#### **4. Моделювання ланцюга постачання зернових**

##### **4. 1. Теоретичне обґрунтування оптимізаційної моделі**

Процес доставки зернових залізнично-водним маршрутом на зовнішні ринки представляє собою мультимодальний (інтермодальний) ланцюг постачання, який умовно можна розкласти на наступні елементи (рис. 1):

- 1) накопичення вантажів у пунктах відправлення вантажів;
- 2) вивезення партій вантажу з пунктів накопичення до пунктів концентрації;
- 3) концентрація партій вантажу для його доставки залізничними маршрутами у морський торговельний порт відправлення;
- 4) доставка залізничними маршрутами вантажу у морський торговельний порт відправлення;
- 5) накопичення вантажу до норми завантаження у судно;
- 6) завантаження та доставка вантажу у порт призначення;
- 7) дистрибуція вантажу у країні призначення до кінцевих пунктів призначення.

Тоді загальний час доставки вантажу буде сукупністю витрат часу на кожному етапі ланцюга постачання:

$$t_{\text{дост.}} = t_{\text{нак.відпр.}} + t_{\text{вив.}} + t_{\text{конц.}} + t_{\text{зал.маршр.}} + t_{\text{накоп.порт}} + t_{\text{транс.море}}, \quad (1)$$

Де  $t_{\text{нак.відпр.}}$  – середній час знаходження вантажів на залізничних станціях відправлення;

$t_{\text{вив.}}$  – середній час транспортування вантажу від станцій відправлення до станції формування залізничних маршрутів в порт;

$t_{\text{конц.}}$  – час знаходження вантажів на станції формування залізничних маршрутів в порт;

$t_{\text{зал.маршр.}}$  – час транспортування вантажів від станції формування до морського торговельного порту;

$t_{\text{накоп.порт}}$  – час знаходження вантажів у морському торговельному порту відправлення;

$t_{\text{транс.море}}$  – час транспортування вантажів морською лінією від порту відправлення до порту призначення.

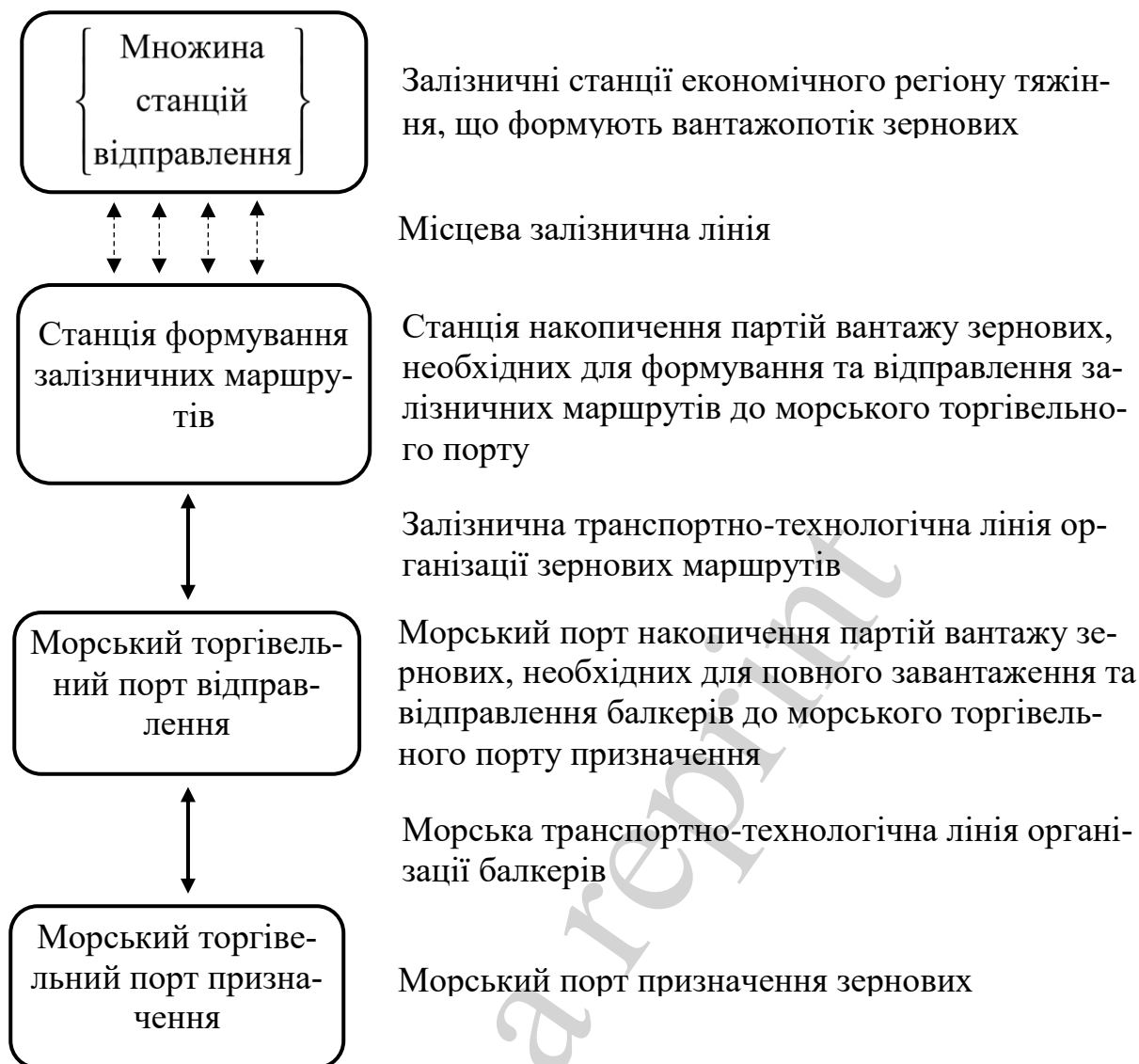


Рис. 1. Структурно-логічна схема логістичного ланцюга постачання

В свою чергу, кожна складова виразу (1) залежатиме від параметрів відповідного елементу логістичної системи ланцюга постачання:

$$t_{\text{нак.відпр.}} = f(N_{\text{доб.}}, m_{\text{зб.лок.}}, m_{\text{зб.скл.}}, m_{\text{ваг.}}, S_i : S_N), \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2)$$

де  $N_{\text{доб.}}$  – середня інтенсивність надходження зернових у пункти відправлення. Даний параметр може бути формалізований як випадкова (експонентна) функція від середньої інтенсивності ( $\lambda_{\text{доб.}}$ ) надходження до відправлення зернових по  $i$ -ї станції:

$$N_{\text{доб.}} = \text{Exp}(\lambda_{\text{доб.}}), \quad (3)$$

$m_{\text{зб.локом}}$  – розрахункова кількість місцевих (вивізних, поїзних) локомотивів для збирання та концентрації вантажу із станцій відправлення на станцію формування залізничних маршрутів, лок.;

$m_{зб.скл.}$  – розрахунковий склад збірного поїзда, вагонів;

$m_{ваг.}$  – робочий парк вагонів для організації постачання зернових від станцій відправлення до морського торговельного порту;

$S_i; S_N$  – множина станцій відправлення із відповідними наборами транспортно-технологічних характеристик – місткість елеваторів, інтенсивність надходження зернових до відправлення, відстань до станції формування маршрутів, продуктивність навантажувальних комплексів, час обробки поїздів по відправленню, маршрутна швидкість прямування по залізничній мережі;

$N$  – кількість станцій.

$$t_{вив.} = f(L_i, v_{м.}), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

де  $L_i$  – відстань від  $i$ -ї станції відправлення до станції формування зернових маршрутів, км;

$v_{м.}$  – середня (маршрутна) швидкість руху місцевих поїздів на полігоні збирання та концентрації партій вантажу.

$$t_{конц.} = f(S_b, m_{лок.}, m_{м.п.}), \quad (5)$$

де  $S_b$  – станція формування залізничних маршрутів до морського торговельного порту із відповідними транспортно-технологічними параметрами: місткість колійного розвитку, нормативи технологічного процесу;

$m_{лок.}$  – кількість локомотивів (поїзних) далекого сполучення для організації зернових маршрутів до морського порту;

$m_{м.п.}$  – кількість вагонів у складі зернового маршруту.

$$t_{зал.маршр.} = f(m_{лок.}, m_{м.п.}, L_{з-п}, v_{з-п}), \quad (6)$$

де  $L_{з-п}$  – довжина залізничного напрямку від станції формування зернових маршрутів до станції призначення, що обслуговує морський торговельний порт відправлення;

$v_{з-п}$  – середня маршрутна швидкість руху зернових маршрутів на залізничному напрямку  $L_{з-п}$ .

$$t_{накоп.порт} = f(S_{п}, m_{с}, m_{к}), \quad (7)$$

де  $S_{п}$  – морський торговельний порт відправлення із набором відповідних транспортно-технологічних характеристик: місткість зернових елеваторів, продуктивність портових пунктів перевантажування;  $m_{с.}$  – парк суден (балкерів);  $m_{к.}$  – комерційна (корисна) місткість судна.

$$t_{транс.море} = f(L_{м}, v_{с.м.}), \quad (8)$$

де  $L_M$  – протяжність морської лінії між портом відправлення та портом призначення;  $v_{с.м.}$  – середня швидкість ходу суден на маршруті  $L_M$ .

Ключовим в оптимізації ланцюгів постачання виступає час доставки вантажів, який необхідно забезпечувати мінімально можливим. В той же час, наявні виробничі ресурси мають використовуватись раціонально, а вся логістична система повинна забезпечувати належний рівень надійності (відмовостійкості). Тоді вираз (1) із врахуванням функціональних залежностей (2)–(8) можна представити як цільову функцію оптимізації, при цьому критерієм оптимізації виступатиме середній час доставки зернових в межах всього ланцюга постачання:

$$t_{\text{дост.}} = f\left(\text{Exp}\left(\lambda_{\text{доб.}}\right), m_{\text{зб.лок.}}, m_{\text{зб.скл.}}, m_{\text{ваг.}}, S_i : S_N\right) + \\ + f\left(L_i, v_{\text{м.}}\right) + f\left(S_b, m_{\text{лок.}}, m_{\text{м.п.}}\right) + f\left(m_{\text{лок.}}, m_{\text{м.п.}}, L_{\text{з-п}}, v_{\text{з-п}}\right) + \\ + f\left(S_{\text{п}}, m_{\text{с}}, m_{\text{к}}\right) + f\left(L_{\text{м}}, v_{\text{с.м.}}\right), i = 1, 2, \dots, N \rightarrow \min; \quad (9)$$

при обмеженнях:

$$\begin{cases} \xi_p \leq \varphi(m_{\text{зб.лок.}}) \leq \xi_n, \\ \xi_p \leq \varphi(m_{\text{ваг.}}) \leq \xi_n, \\ \xi_p \leq \varphi(m_{\text{лок.}}) \leq \xi_n, \\ \xi_p \leq \varphi(m_{\text{с}}) \leq \xi_n, \end{cases} \quad (10)$$

де  $\varphi(m_{\text{зб.лок.}})$ ,  $\varphi(m_{\text{ваг.}})$ ,  $\varphi(m_{\text{лок.}})$ ,  $\varphi(m_{\text{с}})$  – середньодобове завантаження відповідних парків транспортних засобів. Визначається як середня частка використання від загального робочого часу в межах доби;

$\xi_p$  – гранична межа раціональності використання обраних параметрів логістичної системи;

$\xi_n$  – гранична межа надійності завантаження обраних параметрів логістичної системи.

Отримана оптимізаційна математична модель (9) разом із обмеженнями (10) представляє собою багатопараметричну задачу стохастичного програмування. При цьому функція оптимізації (9) представлена у неявному виразі, отже не може бути розв'язана аналітичними методами. Одним із можливих варіантів розв'язання даної науково-прикладної задачі може бути комп'ютерна симуляція.

## 4. 2. Розробка імітаційної моделі

Для ефективного розв'язання поставленої оптимізаційної задачі необхідно визначитись із додатковими обмеженнями та припущеннями:

1) пропускна спроможність залізничних транспортних систем та портової інфраструктури є достатньою і не суттєво впливає на час доставки вантажів за обраним логістичним маршрутом;

2) вхідні потоки вантажів до станцій відправлення є Пуассонівськими;

3) всі черги із заявок (рухомий склад, канали обслуговування, прилади обслуговування) обслуговуються за принципом FIFO («first in, first out») – в першу чергу обслуговується та заявка (чи прилад), що розташований перший в черзі;

4) організується постачання тільки одного виду вантажу, отже весь рухомий склад уніфікований для нього.

Імітаційна модель представлятиме собою імітацію логістичного процесу, представленого на рис. 1. Оскільки весь ланцюг постачання представляє собою взаємодію окремих логістичних підсистем, глобально імітаційна модель буде базуватись на агентному принципі. Крім того, кожний з підпроцесів логістичних підсистем можна умовно представити як дискретний потік переходів стану елементів цих процесів. Кожний підпроцес чітко регламентований у часі, із умовними межами (моментами часу) початку та закінчення тривалості відповідних операцій. Отже такі підпроцеси є дискретними і будуть імітуватись за дискретно-подієвим принципом.

Імітаційну модель розроблено в середовищі AnyLogic Research Edition 8.6 та вбудованого програмного компілятора Java SE.

Імітація процесу починається з популяції агентів *CargoStationPoint* (табл. 1), де блоком *source* симулюється дискретно-подієвий процес надходження заявок *cargoModule* (вантажу, зернових, тонн) до зернових елеваторів накопичення (блок *Accumulation*) (рис. 2).

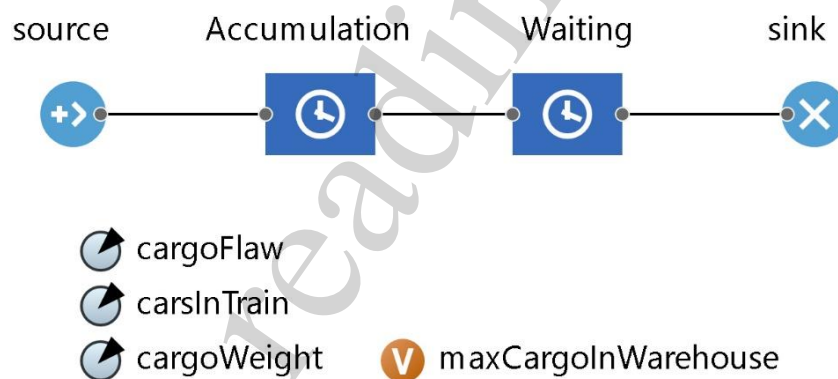


Рис. 2. Дискретно-подієвий бізнес-процес залізничних станцій накопичення та відправлення зернових

У блоці *Accumulation*, при надходженні до нього з блоку *source* кожної заявки *cargoModule*, за допомогою Java – коду реалізується алгоритм:

```
if (Accumulation.size() >= carsInTrain){
    for (int i=0; i < carsInTrain; i++){
        Accumulation.stopDelay(Accumulation.get(i));

        Order order=new Order( this );
        send ( order, main.distribution);
    }
    timeCargoStationAccum.add(time() – agent.timeSource);
```



що управляє процесом накопичення вантажної маси. При досягненні вантажної маси до встановленої для вивезення норми партії вантажу (змінна *carsInTrain*), до агенту *Distribution* надсилається відповідний агент-інформаційна заявка *Order*.

Таблиця 1  
Характеристика агентів імітаційної моделі

Назва агенту	Функція агенту	Симуляція – відповідність реальному процесу
Main	Головний агент моделі. Організації взаємодії інших агентів між собою.	Головне вікно презентації моделі.
CargoStationPoint	Популяція (множина) агентів залізничних станцій відправлення вантажу	Функціонування залізничних станцій по накопиченню зернових, завантаженні їх у вагони, формування та відправлення збірних поїздів
Distribution	Транспортне виробництво на залізниці	Бізнес-процес транспортного виробництва між станціями відправлення, формування та призначення залізничних маршрутів. Організація роботи локомотивів вивізної роботи та локомотивів, що обслуговують залізничні маршрути. Управління парком вагонів та парками локомотивів
MainStation	Станція формування та відправлення залізничних маршрутів	Взаємодія станції відправлення залізничних маршрутів із іншими підсистемами залізниці
SeaPort	Морський торговельний порт відправлення. Транспортне виробництво на морській лінії	Бізнес-процес транспортного виробництва між морськими торговельними портами відправлення та призначення. Організація роботи балкерів. Управління парком балкерів.
SeaPortAlexandria	Морський торговельний порт призначення	Взаємодія порту призначення із іншими елементами морської транспортно-технологічної лінії
Car, LocomDistrib, LocomMain, Ship	Множини (популяції) агентів відповідно залізничних вагонів, місцевих локомотивів, локомотивів зернових маршрутів та суден (балкерів)	Транспортні одиниці відповідних парків. Імітація руху в межах відповідних транспортно-технологічних ліній
cargoModule	Множина (популяція) агентів вантажного потоку	Імітація просування вантажної маси в межах логістичного ланцюга постачання. Кожний агент відповідає елементу вантажної маси – тоні
Order	Множина (популяція) агентів партій вантажу	Імітація просування партій вантажу, що відповідає комерційній ємності одного транспортного засобу (вагону, поїзда, судна)

Зазначений алгоритм симулює надсилання інформаційного повідомлення про готовність до відправлення необхідної партії вантажу. Відповідна інформа-

ційна заявка передається зі станцій відправлення (накопичення) вантажів до диспетчерського центру управління вагонним та локомотивним парком.

При надходженні через блок *enter* кожна інформаційна заявка *Order* потрапляє до блоку *seizeCars* (типу *Seize*) агенту *Distribution*, де поступає у чергу на обслуговування (рис. 3). Для обслуговування кожної заявки блоком *seizeCars* здійснюється захват необхідної кількості вільних ресурсів:

1) агентів *Car* – порожніх вагонів – зерновозів. Управління парком вагонів здійснюється блоком *rp\_Cars*;

2) агентів *LocomDistrib* – вивізних локомотивів місцевого сполучення. Управління парком вагонів здійснюється блоком *rp\_DistrLocoms*.

Заявка *Order* не може бути обслугована і знаходиться в очікуванні, доки не з'явиться достатня кількість вільних ресурсів *Car* та *LocomDistrib*.

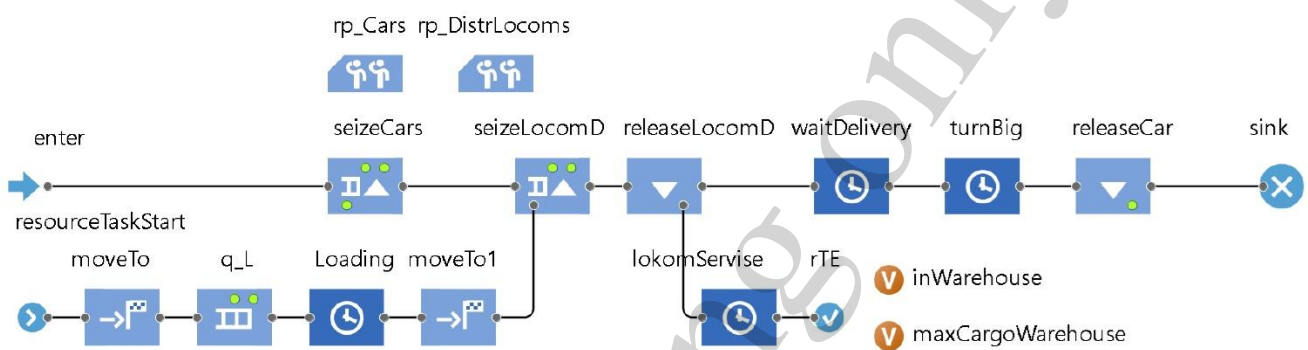


Рис. 3. Перший дискретно-подієвий бізнес-процес агенту *Distribution*

Після захвату ресурсів блоком *seizeCars*, блоком *moveTo* реалізується дискретно-подієвий підпроцес слідування вивізного локомотиву із порожніми вагонами до станції відправки відповідної (до заявки *Order*) партії вантажу.

При прибутті до станції відправлення блоками *q\_L* та *Loading* симулюється процес навантаження. Блок *q\_L* (типу *Queue*) симулює чергу в очікуванні завантаження вагонів. Блок *Loading* – багатоканальний процес завантаження вагонів на зернових елеваторах станції відправлення вантажів.

Після завантаження поїзд із вантажем слідує до станції формування залізничних маршрутів (блок *moveTo1*). Після прибуття вивізний локомотив звільняється від роботи, проходить відповідне технічне обслуговування (блоки *lokomService* та *rTE*) і повертається до блоку *DistrLocoms*, де очікує нової заявки *Order* на обслуговування.

Сам вантаж (заявка *Order*) у вагонах (агенти *Car*) накопичується до необхідної кількості формування зернового маршруту – блок *waitDelivery*. При накопиченні до норми маси зернового маршруту, до блоку *source* другого підпроцесу агенту *Distribution*, за допомогою функції *source.inject(1)*, генерується інформаційна заявка готового до відправлення складу зернового маршруту (рис. 4). Другий підпроцес симулює формування та відправлення зернових маршрутів до морського торговельного порту.

Після отримання заявки на відправлення маршруту реалізовується схожий із першим підпроцесом (рис. 3) процес захвату вільного ресурсу – магістраль-

ного локомотиву (*LocomMain*), парк яких управляється блоком *rp\_LocomMain*. Після вивантаження в портовому терміналі (*Unloading*), порожній маршрут (локомотив і вагони) повертаються (блоки *turnBig*, рис. 3, та *moveTo3*, рис. 4) до станції формування зернових маршрутів. Далі відповідний локомотив і вагони, після технічного обслуговування, переходять у стан очікування в обслуговуванні наступних виробничих заявок на перевезення.

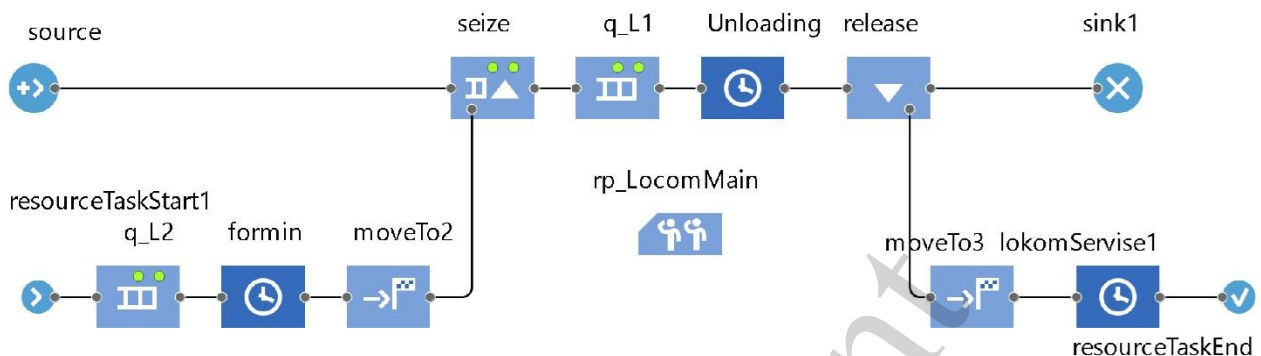


Рис. 4. Другий бізнес-підпроцес агенту *Distribution*

В блоці *sink1* (рис. 4) при надходженні кожної партії вантажу у зерновому залізничному маршруті, через Java – код:

```
if (cargoInSeaTerminal >= main.cargoInShip){
    main.seaPort.source.inject(1);
    cargoInSeaTerminal -= main.cargoInShip;
}
```

реалізується алгоритм накопичення до норми завантаження судна (балкера). При накопиченні необхідної партії (параметр *cargoInShip*) за допомогою процедури *source.inject (1)* імітується відправлення інформаційної заявки у наступний процес ланцюга постачання – морську технологічну лінію (рис. 5).

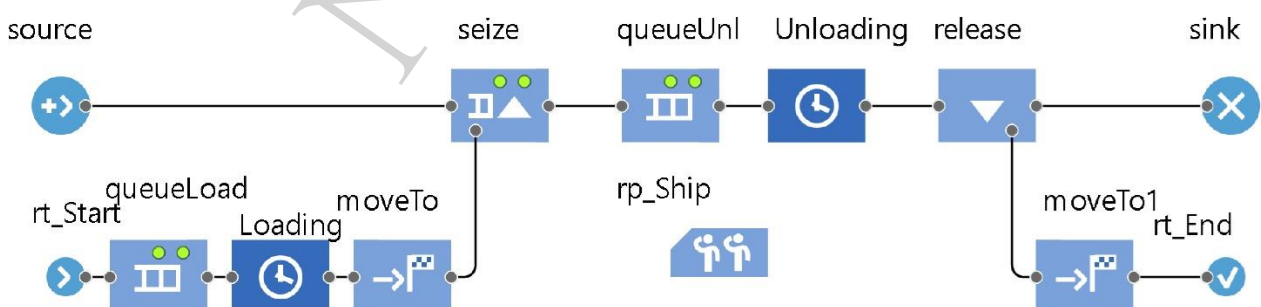


Рис. 5. Бізнес-процес агенту *SeaPort*

Даний процес ідентичний другому бізнес-підпроцесу агенту *Distribution* (рис. 4). В якості вільних ресурсів тут використовується парк суден (популяція агентів *Ship*), управління яких здійснюється блоком *rp\_Ship*.

#### 4. 3. Реалізація імітаційної моделі

##### 4. 3. 1. Вихідні дані

Для перевірки адекватності моделі та можливості забезпечення належного рівня достовірності результатів дослідження, розроблену модель реалізовано на прикладі одного з реальних процесів постачання зернових (зерно пшеничне) з України до Єгипту. Вихідні дані ланцюга постачання представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані симуляції ланцюга постачання зернових

Параметр	Значення
Річний обсяг відправлення, тисяч тонн на рік:	
– Новоград-Волинський	104000
– Яблунець	78000
– Курне	52000
– Горбаші	52000
– Нова Борова	52000
– Коростень	149500
– Бердичів	104000
Норма маси складу місцевого (вивізного) поїзда, тонн	650
Норма маси зернового маршруту, тонн	3250
Норма комерційного завантаження судна, тонн	25000
Кількість каналів обслуговування вантажних терміналів	одноканальні
Тривалість вантажних операцій:	
– розподіл часу: трикутний	$[0,95t; t; 1,25t]$
– середній час завантаження вагонів на станціях відправлення разом із станційними операціями $t$ , хв.;	120
– середній час вивантаження вагонів у портовому терміналі разом із супутніми операціями $t$ , хв.;	200
– середній час завантаження судна разом із портовими операціями $t$ , хв.;	900
– середній час вивантаження судна разом із портовими операціями $t$ , хв.;	1000

В Україні:

1) регіон виробництва продукції та відправлення вантажу: Житомирська область, станції Новоград-Волинський, Яблунець, Курне, Горбаші, Нова Борова, Коростень, Бердичів;

2) станція накопичення, формування та відправлення зернових маршрутів - – Житомир;

3) морській торговельний порт відправлення – Миколаїв;

В Єгипті: морський торговельний порт призначення – Александрія.

#### 4. 3. 2. Адекватність моделі, валідація програмного коду, та оцінка достовірності результатів

Валідація програмного коду проводилась покроково із компіляцією Java-коду всіх агентів окремо. При компіляції як окремих агентів, так й моделі в цілому, програмних помилок не виявлено.

Достовірність отриманих результатів забезпечувалась визначенням мінімальної кількості реплікацій та мінімально-необхідного модельного часу. Рівень достовірності результатів не менше 95 % (із імовірністю похибки не більше 5 %) буде досягатись при мінімум чотирьох реплікаціях та п'яти роках модельного часу.

Адекватність моделі перевірялась через порівняння результатів базового експерименту із нормативними та фактичними. При прогонах моделі із різними розмірами парків транспортних засобів, час доставки коливається в межах від 180 до 400 годин. Даний діапазон відповідає існуючим фактичним та нормативним значенням часу доставки вантажів мультимодальними залізнично-водним маршрутами на відстані 1500–3000 км [26].

#### 4. 3. 3. Проведення базового експерименту та збір статистики результатів імітаційного моделювання

При прогоні базової моделі проводився замір, збір та систематизація наступних результатів експерименту:

1. Структура часу доставки вантажу на всьому етапі ланцюга постачання – визначалась як математичне очікування всієї статистичної вибірки експериментальних даних.

2. Середня завантаженість парків транспортних засобів: вагонів, вивізних локомотивів, локомотивів зернових маршрутів, суден. Визначалась як результат функції *utilization()* відповідних блоків типу «*ResourcePool*» (тобто «ресурс») агентів *Distribution* і *SeaPort*.

3. Максимальна кількість вантажу, що зосереджується на станціях відправки та станції формування зернових маршрутів визначалась встановленням максимального значення змінної фактичної кількості знаходження вантажу у пунктах накопичення бізнес-процесів агентів *Distribution* і *SeaPort* за допомогою Java-коду:

```
if ((accum+wait)*cargoWeight>
    >maxCargoInWarehouse){
    maxCargoInWarehouse=
    =(accum+wait)*cargoWeight;
}
```

де *accum* – змінна, що визначає кількість вантажу в накопиченні необхідної до відправлення партії, тонн;

*wait* – змінна, що визначає кількість вантажу, що чекає відправлення з відповідної логістичної підсистеми.

#### 4. 3. 4. Експерименти оптимізації

Для визначення оптимального значення часу доставки вантажу (9) із встановленими критеріями (10) реалізовано експеримент оптимізації із зміною цілочисельних параметрів кількості транспортних одиниць (10).

Нижня межа (раціональності) приймається  $\xi_p=0,5$ , верхня межа (надійності)  $\xi_n=0,75$ . В результаті проведення експерименту не було знайдено варіанту, який задовольняє умовам (10) через неприйнятне завантаження парку локомотивів організації зернових маршрутів (рис. 6, 7):

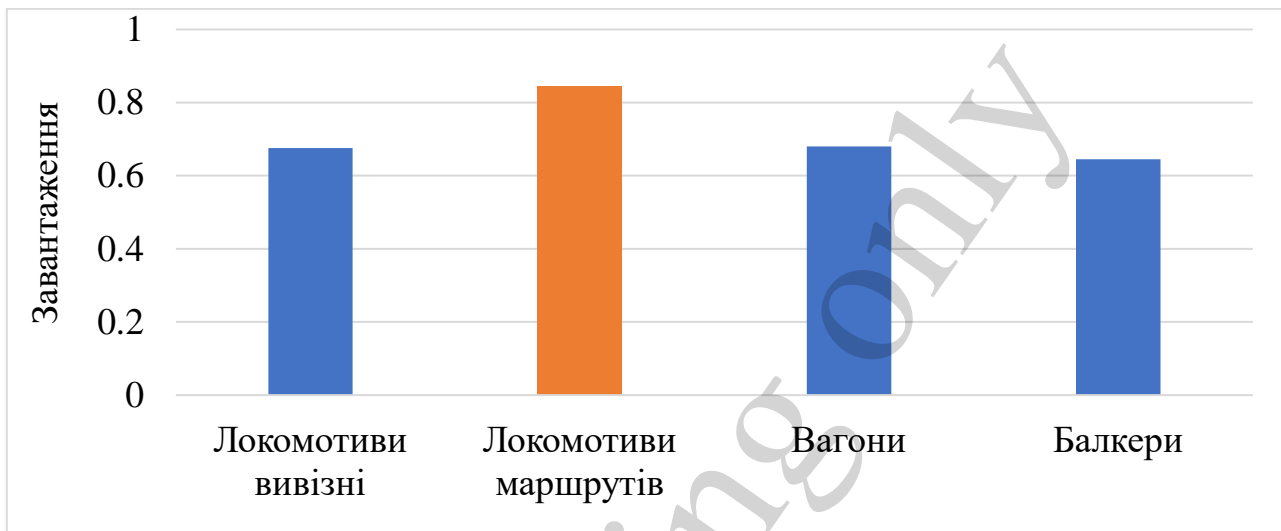


Рис. 6. Завантаження парків транспортних засобів при одному локомотиву зернових маршрутів

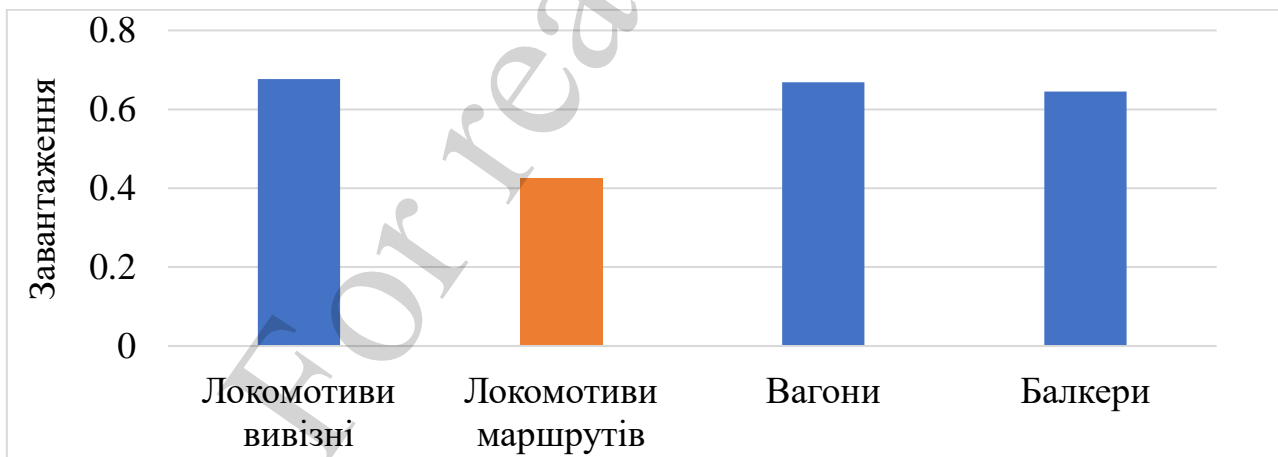


Рис. 7. Завантаження парків транспортних засобів при двох локомотивах зернових маршрутів

Враховуючи той принцип, що при відсутності варіанту вихідних параметрів, при якому забезпечувались умови обмеження оптимізації (10), приймається той варіант, який порушує нижню межу – межу раціональності. Тому для базового сценарію приймається два локомотиви організації зернових маршрутів.

В результаті експериментів оптимізації отримані наступні результати параметрів ланцюга постачання зернових з України до Єгипту табл. 3.

Таблиця 3  
Розрахункові значення вихідних параметрів моделювання

Розрахунковий параметр	Значення	Коефіцієнт завантаження
Потрібний парк вивізних локомотивів	1	0.677
Потрібний парк локомотивів для організації зернових маршрутів	2	0.425
Потрібний парк вагонів	120	0.669
Потрібний парк суден (балкерів)	2	0.645

Всі парки транспортних засобів завантажені оптимально, крім локомотивів зернових маршрутів. Дана ситуація є цілком нормальною для дискретних (цілочисельних) задач.

Максимальний, зафіксований обсяг, потрібний у місткості (ємності) складської та транспортної інфраструктури (рис. 8, 9), вказує на незначне перевищення цього показника норми завантаження відповідних транспортних одиниць, що свідчить про достатньо-високий рівень логістичної відмовостійкості всього ланцюга постачання.

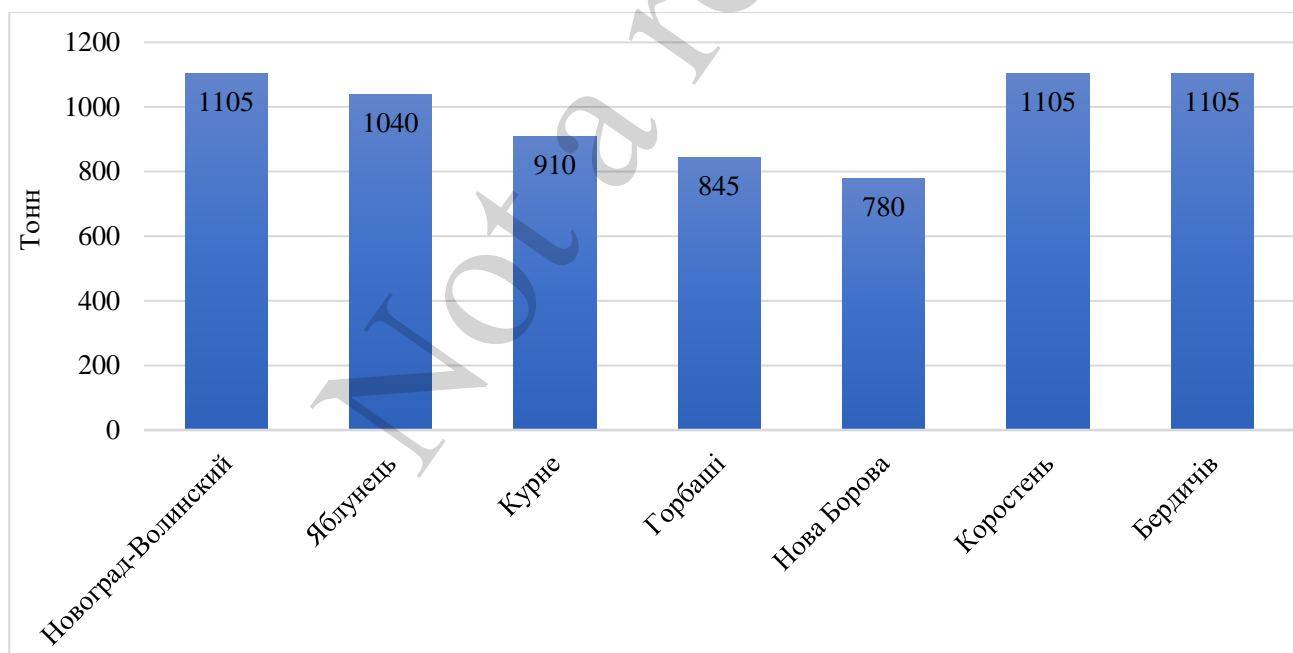


Рис. 8. Максимальний обсяг вантажу в елеваторах станцій відправлення при накопиченні вантажу за весь період моделювання

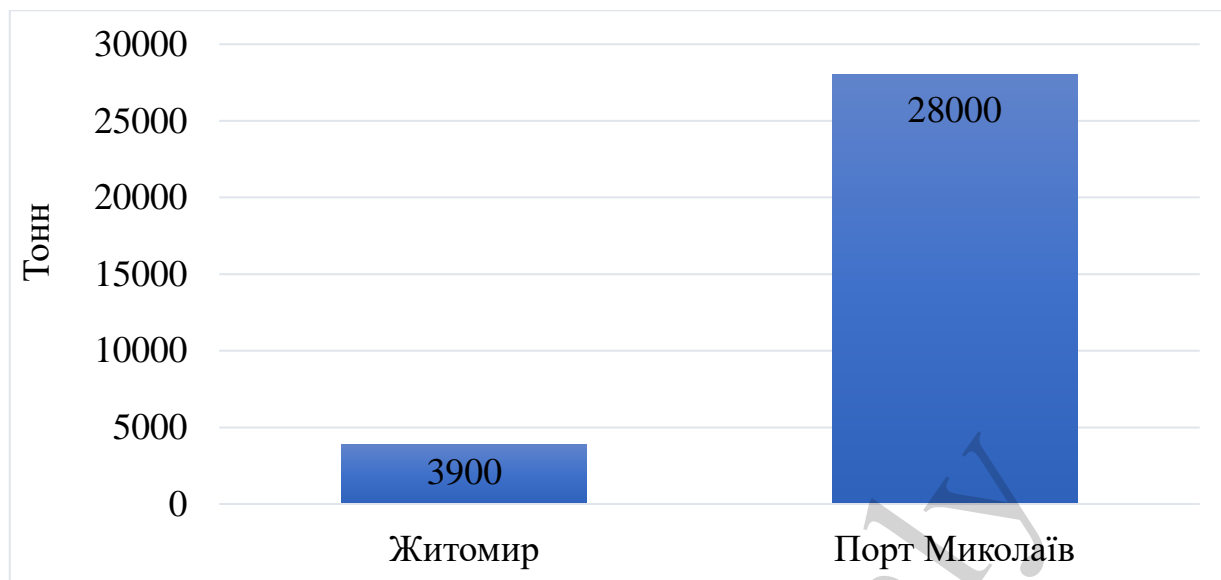


Рис. 9. Максимальний обсяг вантажу в елеваторах станції формування маршрутів (Житомир) та морського порту відправлення (Миколаїв) за весь період моделювання

Структура часу доставки представлена у табл. 4.

Таблиця 4  
Структура часу доставки

Етап ланцюга постачання	Тривалість, годин	Частка від загального
Етап 1 – накопичення вантажу на станції відправлення та доставка до станції формування залізничних маршрутів	29.3	15.8 %
Етап 2 – накопичення вантажу на станції формування маршрутів, відправлення та доставка зернових маршруті до порту відправлення	25.8	14.0 %
Етап 3 – накопичення вантажу в порту відправлення та доставка до порту призначення	129.9	70.3 %
Разом	184.9	100 %

Більша частина часу всього ланцюга постачання припадає на морську лінію (70,3 % всього часу), що пов'язано із значним часом для накопичення потрібної до відправлення партії (25000 тон) і найбільших витрат часу на безпосередні вантажні операції і транспортування.

##### 5. Обговорення результатів імітаційного моделювання мультимодального ланцюга постачання зернових

Отриманні результати моделювання досить логічно пояснюють сутність мультимодальних процесів ланцюгів постачання. Надійність функціонування всього процесу, в цілому, забезпечується ритмічним функціонуванням на кож-



ному етапі поставки. Саме кожний ланцюг в єдиній технологічній системі формує вхідний потік для кожного наступного за порядком ланцюга. Тому час перебування вантажу на певному етапі транспортування заложитиме не тільки від транспортно-технологічних параметрів даної підсистеми, але й від параметрів всіх попередніх підсистем (1), рис. 1.

Отже саме системний підхід, що реалізований у агентній імітації представленої моделі, дозволив встановити оптимальні розміри парків одразу у всіх трьох транспортних підсистемах (табл. 3) та, як результат, забезпечити прийнятний час доставки вантажів (табл. 4). Крім того, саме системний підхід дозволяє оптимізувати обсяг складських запасів у транзитних пунктах накопичення партій вантажів. Місткість колійного розвитку станції формування залізничних маршрутів та елеваторів порту відправлення не перевищує 30 % від розрахункової місткості відповідних транспортних одиниць (рис. 9, табл. 2).

Однак відносно велика місткість елеваторів накопичення зернових на станціях відправлення досить чітко висвітлює недолік представленої в цій роботі імітаційної моделі (табл. 2, рис. 8). І цей недолік полягає не в формалізації процесу збирання зернових на полігоні залізниць (2), (4), а в симуляції відповідного процесу імітаційної моделі (алгоритм, представлений на рис. 3). Ситуацію можна пояснити тим, що при досить розгалуженій мережі залізниць (рис. 1, елемент «Множина станцій відправлення», табл. 2 пункт «Річний обсяг відправлення, тисяч тонн на рік») місцевий (вивізний) локомотив одним рейсом обслуговує тільки одну станцію. Хоча в дійсності може розвозити вагони і по інших станціях полігону, які знаходяться в межах даного маршруту. Таке припущення при розробці алгоритму моделі приведе до перепробігу вивізних локомотивів і, як наслідок, їх достатньо високого завантаження при відносно низькій ефективності. Зазначений недолік і може виступати напрямком вдосконалення алгоритму представленої імітаційної моделі в майбутньому.

## **6. Висновки**

1. Логістичний процес постачання зернових мультимодальним (залізнично-водним) маршрутом формалізовано як оптимізаційну модель сукупного часу доставки вантажів із обмеженнями по раціональному та надійному (безвідмовному) завантаженню парків транспортних засобів. Оптимізаційна модель враховує стохастичність надходження транспортних потоків, тривалості технологічних операцій та узгодженість графіків постачання в межах кожного з логістичних ланцюгів. Модель представлено у неявному виразі, тому поставлена науково-прикладна задача може бути розв'язана тільки експериментально. Зазначений підхід дозволяє реалізувати системний підхід при оптимізації одразу всього ланцюга постачання зернових на залізнично-водному маршруті.

2. Розроблена імітаційна модель представляє собою імітацію взаємодії агентів логістичної (транспортної та складської) інфраструктури – сімох агентів залізничних станцій відправлення, одного агента залізничної станції формування зернових маршрутів, одного агента морського порту відправлення та одного агента морського порту призначення.

Разом із агентами транспортної інфраструктури модель імітує взаємодію популяцій агентів парків транспортних засобів (вагонів, місцевих локомотивів, локомотивів зернових маршрутів, суден) та інформаційних заявок на перевезення. Кількість агентів в кожній популяції є вихідним параметром моделювання, що дозволяє проводити цілочисельні оптимізаційні експерименти із розробленою моделлю.

Для симуляції відповідних бізнес-процесів у кожному агенті транспортно-технологічних ліній застосовано дискретно-подієвий принцип імітації. Такий підхід дозволяє моделювати затримки при транспортуванні вантажів в межах логістичних ланцюгів постачання.

3. Імітаційну модель реалізовано у середовищі Java SE та AnyLogic RE. Експериментом оптимізації вдалось знайти оптимальний комплект компоновки парків транспортних одиниць, відповідно до якого тривалість завантаження коливається в межах 0,4–0,68.

Більшість часу доставки вантажів, в межах всього ланцюга постачання, припадає на морську технологічну лінію (70,3 %), що є цілком природнім через найбільшу вантажомісткість кожного судна та відстані для транспортування.

Встановлено потрібні обсяги місткості зернових елеваторів для кожного з ланцюгів постачання. Значення цих обсягів не перевищує 100 % місткості відповідних транспортних одиниць. Це свідчить про прийнятний рівень відмовостійкості всієї логістичної системи.

### Література

1. De Bok, M., Tavasszy, L., Thoen, S. (2020). Application of an empirical multi-agent model for urban goods transport to analyze impacts of zero emission zones in The Netherlands. *Transport Policy*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.07.010>
2. Ziemke, D., Kaddoura, I., Nagel, K. (2019). The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data. *Procedia Computer Science*, 151, 870–877. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.120>
3. Llorca, C., Kuehnel, N., Moeckel, R. (2020). Agent-based integrated land use/transport models: a study on scale factors and transport model simulation intervals. *Procedia Computer Science*, 170, 733–738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.163>
4. Leng, N., Corman, F. (2020). How the issue time of information affects passengers in public transport disruptions: an agent-based simulation approach. *Procedia Computer Science*, 170, 382–389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.068>
5. Müller, S. A., Leich, G., Nagel, K. (2020). The effect of unexpected disruptions and information times on public transport passengers: a simulation study. *Procedia Computer Science*, 170, 745–750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.161>
6. Calabrò, G., Inturri, G., Pira, M. L., Pluchino, A., Ignaccolo, M. (2020). Bridging the gap between weak-demand areas and public transport using an ant-

colony simulation-based optimization. *Transportation Research Procedia*, 45, 234–241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.012>

7. Lee, E., Zaman Patwary, A. U., Huang, W., Lo, H. K. (2020). Transit interchange discount optimization using an agent-based simulation model. *Procedia Computer Science*, 170, 702–707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.168>

8. Hebenstreit, C., Fellendorf, M. (2018). A dynamic bike sharing module for agent-based transport simulation, within multimodal context. *Procedia Computer Science*, 130, 65–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.013>

9. Sommerfeld, D., Teucke, M., Freitag, M. (2018). Identification of Sensor Requirements for a Quality Data-based Risk Management in Multimodal Supply Chains. *Procedia CIRP*, 72, 563–568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.193>

10. Kagho, G. O., Balac, M., Axhausen, K. W. (2020). Agent-Based Models in Transport Planning: Current State, Issues, and Expectations. *Procedia Computer Science*, 170, 726–732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.164>

11. Anda, C., Ordonez Medina, S. A., Fourie, P. (2018). Multi-agent urban transport simulations using OD matrices from mobile phone data. *Procedia Computer Science*, 130, 803–809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.139>

12. Thunig, T., Kühnel, N., Nagel, K. (2019). Adaptive traffic signal control for real-world scenarios in agent-based transport simulations. *Transportation Research Procedia*, 37, 481–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.215>

13. Shen, Y., Guo, Y., Chen, W. (2019). Safety analysis of China's marine energy channel based on Multi - Agent simulation. *Energy Procedia*, 158, 3259–3264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.988>

14. Rogeberg, O. (2019). A meta-analysis of the crash risk of cannabis-positive drivers in culpability studies – Avoiding interpretational bias. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 69–78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.11.011>

15. Samsonkin, V., Goretskyi, O., Matsiuk, V., Myronenko, V., Boynik, A., Merkulov, V. (2019). Development of an approach for operative control over railway transport technological safety based on the identification of risks in the indicators of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (102)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184162>

16. Mazaraki, A. A., Boiko, M. H., Bosovska, M. V., Kulyk, M. V. (2020). Multi-agent information service system of managing integration processes of enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 103–108. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/103>

17. Ilchenko, N., Kulik, A., Magda, R. (2018). Trends in development of wholesale trade in Ukraine. *Economic Annals-XXI*, 170 (3-4), 38–42. doi: <https://doi.org/10.21003/ea.v170-07>

18. Bučková, M., Krajčovič, M., Edl, M. (2017). Computer Simulation and Optimization of Transport Distances of Order Picking Processes. *Procedia Engineering*, 192, 69–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.012>

19. Prokhorchenko, A., Parkhomenko, L., Kyman, A., Matsiuk, V., Stepanova, J. (2019). Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*, 149, 86–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.111>

20. Matsiuk, V., Myronenko, V., Horoshko, V., Prokhorchenko, A., Hrushevska, T., Shcherbyna, R. et. al. (2019). Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a “flexible model.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (98)), 32–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162143>
21. Shramenko, V., Muzylyov, D., Shramenko, N. (2020). Methodology of costs assessment for customer transportation service of small perishable cargoes. *International Journal of Business Performance Management*, 21 (1/2), 132. doi: <https://doi.org/10.1504/ijbpm.2020.10027632>
22. De Bok, M., de Jong, G., Tavasszy, L., van Meijeren, J., Davydenko, I., Benjamins, M. et. al. (2018). A multimodal transport chain choice model for container transport. *Transportation Research Procedia*, 31, 99–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.049>
23. Karimi, B., Bashiri, M. (2018). Designing a Multi-commodity multimodal splittable supply chain network by logistic hubs for intelligent manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 17, 1058–1064. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.080>
24. Zhang, X., Zhang, W., Lee, P. T.-W. (2020). Importance rankings of nodes in the China Railway Express network under the Belt and Road Initiative. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 139, 134–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.003>
25. Shramenko, V., Muzylyov, D., Shramenko, N. (2020). Integrated business-criterion to choose a rational supply chain for perishable agricultural goods at automobile transportations. *International Journal of Business Performance Management*, 21 (1/2), 166. doi: <https://doi.org/10.1504/ijbpm.2020.10027634>
26. Shramenko, N. Y., Shramenko, V. O. (2019). Optimization of technological specifications and methodology of estimating the efficiency of the bulk cargoes delivery process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 146–151. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/15>